

C. Sax<sup>a</sup>, C. H. F. Hämmerle<sup>b</sup>, I. Sailer<sup>c</sup>

# 10-year Clinical Outcomes of Fixed Dental Prostheses with Zirconia Frameworks

## Klinische Ergebnisse mit festsitzendem Zirkoniumdioxid-Zahnersatz nach zehn Jahren

a Med. dent. Caroline Sax

b Prof. Dr. med. dent. Christoph Hans Franz Hämmerle

c PD Dr. med. dent. Irena Sailer

alle: Klinik für Kronen- und Brückenprothetik, Teilprothetik und zahnärztliche Materialkunde, Zentrum für Zahnmedizin, Universität Zürich, Schweiz

a Med dent Caroline Sax

b Prof Dr med dent Christoph Hans Franz Hämmerle

c PD Dr med dent Irena Sailer

all at: Clinic for Fixed and Removable Prosthodontics and Dental Materials, School of Dental Medicine, University of Zurich, Switzerland

### Zusammenfassung

**Zielsetzung:** Das Ziel dieser prospektiven klinischen Studie war die Beurteilung der klinischen Langzeitüberlebensraten und der Komplikationsraten für technische und biologische Komplikationen bei Brücken mit einem Zirkoniumdioxid-Gerüst im Seitenzahnbereich.

**Material und Methoden:** Fünfundvierzig Patienten, bei denen eine oder mehrere festsitzende Teilprothesen im Seitenzahnbereich vorgesehen waren, erhielten insgesamt 57 drei- bis fünfgliedrige Brücken auf Zirkoniumdioxid-basis. Die Gerüste wurden mithilfe eines CAM-System-Prototypen, dem direct ceramic machining (DCM; wörtl.: direkte Keramikbearbeitung) hergestellt, bei dem das Zirkoniumdioxid zuerst im Weißzustand verarbeitet wird. Die Gerüste wurden mit dem Prototypen einer Verblendkeramik verblendet. Die Eingliederung der Brücken erfolgte mittels Adhäsivtechnik. Bei Baseline sowie nach sechs Monaten, einem Jahr und nach zwei, drei, fünf, acht sowie zehn Jahren unter Funktion wurden die Brücken im Hinblick auf technische und/ oder biologische Komplikationen untersucht. Darüber hinaus wurde die Gesundheit des Parodonts der Pfeilerzähne (Testzähne) und unbehandelter Kontrollzähne analysiert. Die statistische Analyse erfolgte unter Anwendung deskriptiver Statistik, der Kaplan-Meier-Überlebensanalyse und multipler Regressionsanalysen mit zufälligen Effekten.

### Abstract

**Objectives:** The aim of this prospective clinical study was to assess the long-term clinical survival rate and the technical and biological complication rates of zirconia-based posterior FDPs.

**Materials and Methods:** Forty-five patients in need of one or more posterior FDPs received 57 three- to five-unit zirconia-based FDPs. The frameworks were fabricated by means of a prototype computer-aided manufacturing (CAM) system (direct ceramic machining, DCM), first processing zirconia in the white stage. The frameworks were veneered with a prototype veneering ceramic. The FDPs were adhesively placed. At baseline, 6 months, and 1, 2, 3, 5, 8 and 10 years of function, the FDPs were examined for technical and/or biological complications. Furthermore, the periodontal health of the abutment teeth (test) and untreated control teeth was analyzed. Statistical analysis was performed applying descriptive statistics, Kaplan-Meier survival and multiple mixed effects regression tests.

**Results:** Twenty-one patients with 26 FDPs were examined at a mean observation time of  $10.7 \pm 1.3$  years. A total of 16 FDPs were lost to follow-up. Fifteen FDPs had to be replaced due to technical/biological complications; hence, the 10-year survival rate of the FDPs was 67%. Three framework fractures occurred, resulting in a 10-year survival rate for the zirconia frameworks of

91.5%. Chipping/fracture of the veneering ceramic was detected in 16 FDPs over 10 years (complication rate 32%). A significant correlation of the span of the FDPs and the incidence of chipping was observed: 4- and 5-unit FDPs had a 4.9 times higher probability for chipping than 3-unit FDPs. Marginal discrepancy/degradation was found in 90.7% of the FDPs over 10 years. At 11 of the FDPs (complication rate 27%), secondary caries occurred. No difference of the periodontal health was found around test and control teeth.

**Conclusion:** The zirconia frameworks exhibited very good long-term stability. However, the zirconia-based FDPs frequently exhibited problems such as marginal deficiency or chipping of the veneering ceramic. Both problems may be associated with the prototype status of the system.

**Keywords:** zirconia, framework, fracture, long-term, FDP, chipping, marginal adaptation.

## Introduction

Fixed dental prostheses (FDPs) with metal frameworks are still the gold standard for the replacement of teeth today due to their excellent mechanical stability.<sup>1</sup> Metal-ceramic FDPs exhibit good clinical long-term survival rates, both in the anterior and posterior region of the jaws.<sup>2,3</sup> These good outcomes should be considered as the "benchmark" for FDPs made out of alternative materials such as ceramics. More recently, an increasing need for all-ceramic reconstructions was reported.<sup>4,5</sup> Various new ceramics have been developed for the fabrication of metal-free FDP frameworks.<sup>1,5,6</sup> Reinforced glass ceramics or glass-infiltrated alumina ceramic exhibited superior mechanical stability over the ceramics previously available.<sup>1,7</sup> However, none of those materials attained the good clinical outcomes of metal when used as FDP framework material for the replacement of missing teeth.<sup>8</sup>

The high-strength ceramic zirconia is the latest development with respect to ceramic framework materials.<sup>9,10</sup> Zirconia, or more precisely yttria partially-stabilized tetragonal zirconia polycrystals (Y-TZP), has the best mechanical properties of all previously introduced ceramics.<sup>11,12</sup> Laboratory studies of zirconia-based FDPs indicated that zirconia frameworks might have the potential to withstand the occlusal forces both in anterior and in posterior regions.<sup>10,13–15</sup> Hence, this ceramic was proposed as a valid alternative to metal for the fabrication of FDP frameworks also in cases of multiple-tooth gaps.<sup>16–18</sup>

**Ergebnisse:** Es wurden 21 Patienten mit 26 festsitzenden Brücken über eine mittlere Beobachtungsdauer von  $10,7 \pm 1,3$  Jahren untersucht. Insgesamt standen 16 Brücken für eine Nachbeobachtung nicht zur Verfügung, 15 Brücken mussten aufgrund technischer/ biologischer Komplikationen ersetzt werden, daher lag das Zehn-Jahres-Überleben der festsitzenden Brücken bei 67 %. Es kam zu drei Gerüstfrakturen, was ein Zehn-Jahres-Überleben der Zirkoniumdioxid-Gerüste von 91,5 % ergab. Bei 16 Brücken wurden im Verlauf der zehn Jahre Absplitterungen (Chipping) beziehungsweise Frakturen der Verblendkeramik festgestellt (Komplikationsrate 32 %). Es wurde eine signifikante Korrelation der Spannweite der Brücken mit der Inzidenz von Chipping beobachtet: Vier- und fünfgliedrige Brücken wiesen eine um 4,9-mal höhere Wahrscheinlichkeit von Chipping auf als dreigliedrige Brücken. Im Verlauf der zehn Jahre wurde bei 90,7 % der Brücken ein Randspalt/ Abbau von Zement festgestellt. Bei elf Brücken (Komplikationsrate 27 %) trat eine Sekundärkaries auf. Es wurden keine Unterschiede hinsichtlich der Parodontalgesundheit zwischen den Test- und Kontrollzähnen festgestellt.

**Schlussfolgerung:** Die Zirkoniumdioxid-Gerüste wiesen eine sehr gute Langzeitstabilität auf. Dennoch zeigten sich an den Brücken auf Zirkoniumdioxidbasis häufig Probleme wie Defizite beim Randschluss oder Chipping der Verblendkeramik. Beide Probleme könnten mit dem Prototypenstatus des Systems in Zusammenhang stehen.

**Schlüsselwörter:** Zirkoniumdioxid, Gerüst, Fraktur, Langzeitbeobachtung, Brücke, Chipping, Randschluss

## Einleitung

Festsitzender Zahnersatz (Brücken) mit Metallgerüsten stellt heute aufgrund seiner hervorragenden mechanischen Stabilität noch immer den Goldstandard für den Zahnersatz dar.<sup>1</sup> Metallkeramische Brücken weisen sowohl im Front- als auch im Seitenzahnbereich beider Kiefer ein gutes klinisches Langzeitüberleben auf.<sup>2,3</sup> Diese guten Ergebnisse gelten als Maßstab für die aus alternativen Werkstoffen wie Keramik gefertigten Brücken.

In jüngster Zeit war ein wachsender Bedarf an vollkeramischen Restaurationen zu beobachten.<sup>4,5</sup> Zur Herstellung metallfreier Brückengerüste wurden daher zahlreiche neue Keramiken entwickelt.<sup>1,5,6</sup> Verstärkte Glaskeramiken oder glasinfiltrierte Aluminiumoxidkeramiken zeigten im Vergleich zu den zuvor verfügbaren Keramiken eine

überlegene mechanische Stabilität.<sup>1,7</sup> Dennoch reichte keines dieser Materialien an die guten klinischen Ergebnisse heran, die mit Metall als Brückengerüstmaterial zum Ersatz fehlender Zähne erzielt wurden.<sup>8</sup>

Das hochfeste Keramikmaterial Zirkoniumdioxid ist die jüngste Entwicklung im Bereich der keramischen Gerüstwerkstoffe.<sup>9,10</sup> Zirkoniumdioxid, oder präziser yttriumdotierte, tetragonale Zirkoniumdioxid-Polykristalle (Y-TZP), hat von allen bisher eingeführten Keramiken die besten mechanischen Eigenschaften.<sup>11,12</sup> Laborstudien mit Brücken auf Zirkoniumdioxidbasis weisen darauf hin, dass Zirkoniumdioxid-Gerüste das Potenzial haben könnten, den Kaukräften sowohl im Front- als auch im Seitenzahnbereich standzuhalten.<sup>10,13–15</sup> Daher wurde diese Keramik als valide Alternative zu Metall bei der Herstellung von Brückengerüsten auch im Fall größerer Zahnlücken vorgeschlagen.<sup>16–18</sup>

Die Ergebnisse der bisher veröffentlichten klinischen Studien stützen die Ergebnisse der Laborstudien.<sup>19–27</sup> Aktuelle systematische Übersichtsarbeiten zur Literatur über Brücken auf Zirkoniumdioxidbasis fassten die Ergebnisse zahlreicher klinischer Studien zusammen und bestätigten die insgesamt hervorragende klinische Performance von Brücken mit Zirkoniumdioxid-Gerüsten.<sup>4,9,28</sup> Diese Übersichtsarbeiten belegen auch, dass Zirkoniumdioxid als keramisches Gerüstmaterial eine bessere Leistung zeigte als die zuvor eingesetzten Glaskeramiken und glasinfiltrierten Keramiken.<sup>6,29–32</sup> Die berechnete Fünfjahres-Überlebensrate von Brücken auf Zirkoniumdioxidbasis betrug 94,29 %.<sup>4</sup> Im Gegensatz dazu betrugen die Fünfjahres-Überlebensraten der Brücken aus glasinfiltriertem Aluminiumoxid zwischen 88 und 90 %.<sup>6,29,30</sup> Noch interessanter ist, dass in einer weiteren Studie keine Unterschiede zwischen den Überlebensraten der Brücken mit Zirkoniumdioxid- oder Metallgerüsten gefunden wurden.<sup>19</sup> Gerüstfrakturen fanden Heintze et al.<sup>28</sup> nach einer mittleren Beobachtungsdauer von drei Jahren in unter 1 % bei Zirkoniumdioxid und 0 % der Fälle bei Brücken mit Metallgerüst. Somit könnte Zirkoniumdioxid als Alternative zu Metall als Gerüstmaterial gelten.

Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass Keramiken andere Materialeigenschaften aufweisen als Metall.<sup>33</sup> Diese Materialien zeigen sich unterschiedlich beständig gegenüber Rissen und Brüchen, die als Folge der Alterung im Laufe der klinischen Funktion auftreten.<sup>33</sup> Metalle besitzen eine hohe Bruchzähigkeit, d. h. eine hohe Beständigkeit gegenüber der Ausbreitung von Rissen, und ein geringes Frakturrisiko. Im Gegensatz dazu sind keramische Werkstoffe im Allgemeinen spröde und weisen eine geringere

The results of the clinical studies published so far support the findings of the laboratory studies.<sup>19–27</sup> Recent systematic reviews of the literature on zirconia-based FDPs summarized the findings of numerous clinical investigations and confirmed the excellent overall clinical performance of FDPs with zirconia frameworks.<sup>4,9,28</sup> These reviews also showed that zirconia exhibited a better performance as a ceramic framework material than the previously used glass and glass-infiltrated ceramics.<sup>6,29–32</sup> The estimated 5-year survival rate of the zirconia-based FDPs was 94.29%.<sup>4</sup> In contrast, the 5-year survival rate of FDPs made of glass-infiltrated alumina ranged from 88% to 90%.<sup>6,29,30</sup> Even more interestingly, no differences of the survival rates of FDPs with zirconia and metal frameworks were found in another study.<sup>19</sup> With respect to framework fracture, after a mean observation period of 3 years, Heintze et al.<sup>28</sup> reported less than 1% for zirconia- and 0% for metal-supported FDPs. Thus, zirconia might be considered as an alternative to metal as a framework material.

It must be borne in mind, however, that ceramics have different material properties than metal.<sup>33</sup> These materials exhibit different resistance to flaws and cracks, occurring as a result of aging during clinical service.<sup>33</sup> Metals have high fracture toughness, ie, resistance to the propagation of cracks, and the risk for fracture is low. In contrast, ceramics are generally brittle and exhibit lower fracture toughness. As a result, all-ceramic reconstructions are more prone to crack propagation and consequently fracture over time.<sup>10,16</sup>

The clinical long-term aging behavior of zirconia as a framework material is not yet known. Recent laboratory observations indicate that the exposure of zirconia to moisture and to mechanical loading leads to a decrease in the fracture toughness. However, clinical long-term studies are needed to test the outcome of zirconia over time. Up to now, the longest observation period of zirconia FDPs reported in the literature is 5 years,<sup>25,34,35</sup> a relatively short period in terms of clinical observation. In metal-ceramic FDPs, a decrease of the survival rates can be observed with 10 years or more of clinical function.<sup>3</sup> Hence, in order to judge the clinical suitability of new materials like zirconia, at least 10 years of observing the reconstructions are necessary.

Therefore, the aim of the present investigation was to evaluate the survival and complication rates of posterior FDPs with zirconia frameworks at more than 10 years of clinical function.



## Materials and Methods

The present study population consisted of forty-five patients (18 female, 27 male) with 57 three- to five-unit zirconia-based FDPs located in the posterior maxillary or mandibular region. The study was initiated in the year 1998, clinical treatments were performed until 2000. The requirements of the Helsinki Declaration for this study were fulfilled and informed consent was obtained from all patients.

All details of the study protocol and procedures have been published previously<sup>34,36</sup> and will not be repeated here. The important procedures will briefly be summarized. For more detailed information about the study protocol and the inclusion and exclusion criteria of the patients and abutment teeth, see Sailer et al, 2006.<sup>36</sup>

### Pre-prosthetic and prosthetic procedures

The patients underwent comprehensive dental care before the treatment and during the whole observation period.

The teeth were prepared following the general techniques for metal-ceramic reconstructions adapted to computerized framework production.<sup>37,38</sup>

The frameworks were fabricated with a prototype CAM system (direct ceramic machining, DCM system).<sup>16,17,39</sup> They were milled 25% larger than the original model out of prefabricated white-stage zirconia blanks. Finally, a newly developed prototype veneering ceramic with a coefficient of thermal expansion adjusted for zirconia was applied to the frameworks by means of the layering technique.<sup>36</sup>

The FDPs were adhesively placed using either Variolink (Ivoclar Vivadent) or Panavia 21 TC (Kuraray).

### Follow-up examinations

First, the patients were asked whether or not they had been satisfied with the esthetic and the functional outcomes of the FDPs over the past 10 years.

The FDPs were clinically and radiographically examined at baseline (cementation) and at 6 months, 1, 2, 3,<sup>36</sup> 5,<sup>34</sup> 8 and 10 years. The technical outcome of the reconstructions was assessed as indicated in Table 1. At the 8- and 10-year follow-up visits, in addition to the previous procedures, the technical outcomes of the FDPs were analyzed by means of the modified United States Public Health Service (USPHS) criteria.<sup>40</sup> This was done in order to provide more detailed information on the long-term outcomes (Table 2). Furthermore, the biological outcome was assessed by measuring

Bruchzähigkeit auf. Infolgedessen sind Vollkeramikrestaurationen stärker anfällig für das Wachstum von Rissen und somit mit der Zeit auch für Frakturen.<sup>10,16</sup>

Das langfristige klinische Alterungsverhalten von Zirkoniumdioxid als Gerüstmaterial ist noch unbekannt. Aktuelle Laboruntersuchungen legen aber nahe, dass die Exposition von Zirkoniumdioxid gegenüber Feuchtigkeit und mechanischer Belastung zu einer Abnahme der Bruchzähigkeit führt. Es sind jedoch klinische Langzeituntersuchungen notwendig, um die Ergebnisse mit Zirkoniumdioxid im Zeitverlauf zu bestimmen.

Bis heute sind die längsten in der Literatur verzeichneten Beobachtungszeiträume mit Zirkoniumdioxid-Brücken fünf Jahre,<sup>25,34,35</sup> was für eine klinische Beobachtung ein relativ kurzer Zeitraum ist. Bei metallkeramischen Brücken kann eine Abnahme der klinischen Überlebensraten nach zehn oder mehr Jahren in Funktion beobachtet werden.<sup>3</sup> Um die klinische Eignung eines neuen Materials wie Zirkoniumdioxid beurteilen zu können, ist eine Beobachtung der Rekonstruktionen über mindestens zehn Jahre notwendig. Daher war es das Ziel der vorliegenden Untersuchung, die Überlebens- und Komplikationsraten von Brücken mit Zirkoniumdioxid-Gerüsten im Seitenzahnbereich nach über zehn Jahren in klinischer Funktion zu evaluieren.

## Material und Methoden

Die Studienpopulation bestand aus 45 Patienten (18 Frauen, 27 Männer) mit 57 drei- bis fünfgliedrigen Brücken mit Zirkoniumdioxid-Gerüst im Oberkiefer- oder Unterkiefer-Seitenzahnbereich. Die Studie wurde im Jahr 1998 begonnen und klinische Behandlungen wurden bis ins Jahr 2000 durchgeführt. Der Deklaration von Helsinki wurde bei dieser Studie genüge getan und von allen Patienten wurde eine schriftliche Einwilligung nach Aufklärung eingeholt. Alle Details zum Studienprotokoll und zu den Studienverfahren wurden bereits veröffentlicht.<sup>34,36</sup> Die wichtigen Verfahren werden jedoch kurz zusammengefasst. Genauere Angaben zum Studienprotokoll sowie zu den Einschluss- und Ausschlusskriterien in Bezug auf die Patienten beziehungsweise die Pfeilerzähne finden sich in Sailer et al. (2006).<sup>36</sup>

### Präprothetische und prothetische Vorgehensweise

Die Patienten erhielten vor der Behandlung und im Verlauf des gesamten Beobachtungszeitraums eine umfassende zahnmedizinische Versorgung.

Table 1 Overview of the parameters assessed at all follow-up examinations.  
Tab. 1 Übersicht über die bei den Nachuntersuchungen erhobenen Parameter.

FDP/ Brücke		Abutment teeth/ Pfeilerzähne	
General patient satisfaction on esthetics and chewing comfort allgemeine Zufriedenheit des Patienten mit der Ästhetik und dem Kaukomfort	Technical complications technische Komplikationen	Biological complications biologische Komplikationen	Periodontal parameters (4 sites per tooth) parodontale Parameter (vier Stellen pro Zahn)
	Fracture of the framework Gerüstfraktur	Secondary caries Sekundärkaries	Pocket probing depth (PPD) Sondierungstiefe
	Chipping of veneering Abplatzen der Verblendkeramik (Chipping)	Loss of vitality (carbon dioxide) Vitalitätsverlust (Kohlendioxid)	Plaque control record (PCR) Plaquestatus
	Degradation of marginal adaptation Verlust des Randschlusses	Endodontic problems endodontische Probleme	Probing attachment level (PAL) Attachmentniveau
	Occlusal wear* okklusale Abnutzung*	Tooth fracture Zahnfraktur	Bleeding on probing (BOP) Blutung nach Sondieren
	Retention of FDP Retention der Brücke		

\*Occlusal wear was only assessed at the 8- and 10-year follow-up.

\*Die okklusale Abnutzung wurde nur bei den Nachuntersuchungen nach acht und zehn Jahren erhoben.

Die Präparation der Zähne erfolgte nach den allgemeinen Techniken für metallkeramische Rekonstruktionen, modifiziert für die computergestützte Gerüsterstellung.<sup>37,38</sup> Die Gerüste wurden mithilfe des Prototypen eines CAM-Systems gefertigt (Direct Ceramic Machining System, DCM-System).<sup>16,17,39</sup> Sie wurden aus konfektionierten Zirkoniumdioxid-Rohlingen im Weißzustand um 25 % größer als das Originalmodell gefräst. Abschließend wurde der Prototyp einer neu entwickelten Verblendkeramik mit einem auf Zirkoniumdioxid abgestimmten Wärmeausdehnungs-Koeffizienten in Schichttechnik auf die Gerüste aufgetragen.<sup>36</sup> Die Brücken wurden mit Variolink (Ivoclar Vivadent, Ellwangen) oder Panavia 21 TC (Kuraray, Frankfurt/ Main) adhäsiv zementiert.

## Nachuntersuchungen

Zunächst wurden die Patienten nach ihrer Zufriedenheit mit dem ästhetischen und dem funktionalen Ergebnis der Brücke im Verlauf der vergangenen zehn Jahre befragt. Die Brücken wurden bei Baseline (Eingliederung), nach sechs Monaten, nach einem Jahr sowie nach zwei, drei<sup>36</sup>, fünf<sup>34</sup>, acht und zehn Jahren klinisch und röntgenologisch untersucht. Das technische Ergebnis der Rekonstruktionen wurde wie in Tabelle 1 dargestellt beurteilt.

the periodontal parameters pocket probing depth (PPD), plaque control record (PCR),<sup>41</sup> bleeding on probing (BOP), and probing attachment level (PAL) on test (abutment) and control teeth (analogous contra-lateral or opposing non-restored teeth) (Table 1). Radiographs of the abutment teeth and clinical photographs of the reconstructions were made.

## Statistical analysis

Descriptive statistics were applied to the data. Survival over 10 years was estimated using the Kaplan-Meier method.<sup>42</sup> The complications, together with the corresponding durations until the event were considered. The evaluated complications were fracture of the framework, chipping of the veneering ceramic, caries, marginal discrepancy, and loss of vitality. Subjects who did not experience a complication within 10 years were considered to be censored at the last observed time point. This made it possible to study the survival rates of the FDPs and the zirconia frameworks, as well as the failure rates regarding the technical and biological complications (chipping, caries, marginal degradation and pulp vitality). In addition, the associations between the number of units of the FDP and marginal adaptation or chipping was analyzed and verified both by the Log Rank test and Cox regression. The hazard ratio provided by the Cox

Table 2 Overview of the modified USPHS criteria developed to assess fix dental prostheses.

Tab. 2 Übersicht über die zur Beurteilung festsitzender Zahnprothesen entwickelten, modifizierten USPHS-Kriterien

USPHS	Alpha (A)	Bravo (B)	Charlie (C)	Delta (D)
<b>Framework fracture</b> Gerüstfraktur	No fracture of framework keine Gerüstfraktur			Fracture of framework Gerüstfraktur
<b>Veneering fracture</b> Fraktur der Verblendkeramik	No fracture keine Fraktur	Chipping, but polishing is possible Chipping, Polieren noch möglich	Chipping down to the framework Chipping bis auf Gerüstniveau	New restoration is needed Neuanfertigung notwendig
<b>Occlusal wear</b> okklusale Abnutzung	No occlusal wear on restoration or on antagonist teeth keine Abnutzung der Okklusalfächen an der Restauration oder den Antagonisten	Occlusal wear on restoration or on antagonist teeth is < 2 mm Abnutzung der Okklusalfächen an der Restauration oder an den Antagonisten < 2 mm	Occlusal wear on restoration or on antagonist teeth is > 2 mm Abnutzung der Okklusalfächen an der Restauration oder an den Antagonisten > 2 mm	New restoration is needed Neuanfertigung notwendig
<b>Marginal adaptation</b> Randschluss	No probe catch kein Hängenbleiben mit der Sonde	Slight probe catch, but no gap leichtes Hängenbleiben mit der Sonde, kein Spalt	Gap with some dentin or cement exposure Spalt mit leichter Dentin- oder Zementfreilegung	New restoration is needed Neuanfertigung notwendig
<b>Anatomical form</b> anatomische Form	Ideal anatomical shape; good proximal contact optimale anatomische Form; guter Approximalkontakt	Slightly over or under contoured, weak proximal contact leicht über- oder unterkonturiert, schwacher Approximalkontakt	Highly over or under contoured, open proximal contact deutlich über- oder unterkonturiert, offener Approximalkontakt	New restoration is needed Neuanfertigung notwendig

regression gave an interpretable measure of the strength of the association between a predictor variable and survival. The longitudinal examination over 10 years was conducted using multiple mixed effects regression models, adjusted for the number of units, duration of function, age of patient at cementation, and gender, to determine:

- the occurrence and severity of complications (framework fracture, chipping, marginal degradation, occlusal wear) and
- the periodontal parameters (probing depth, recession development, bleeding on probing, plaque indices)

For the evaluation of the time point "10 years", the relative frequencies of patient satisfaction with their FDP and of complications were calculated. Complications assessed were framework fracture, chipping of the veneering ceramic, caries, degradation of the marginal adaptation, occlusal wear, and loss of vitality. Furthermore, the differences of the periodontal parameters between test and control teeth were analyzed.

Bei den Nachuntersuchungen nach acht und zehn Jahren wurde das technische Ergebnis der Brücken zusätzlich zu den bisherigen Untersuchungen mittels der modifizierten USPHS-Kriterien (United States Public Health Service Criteria) analysiert.<sup>40</sup> Dies diente dazu, genauere Informationen über die Langzeitergebnisse zu erhalten (Tab. 2). Darüber hinaus wurde das biologische Ergebnis durch die Messung folgender parodontaler Parameter beurteilt (Tab. 1): Sondierungstiefe, Plaquestatus<sup>41</sup>, Blutung nach Sondieren und Attachmentniveau nach Sondieren bei Testzähnen (Pfeilerzähne) und Kontrollzähnen (jeweils analoger, kontralateraler oder antagonistischer, nicht restaurierter Zahn). Röntgenbilder der Pfeilerzähne und klinische Bilder der Rekonstruktionen wurden angefertigt.

### Statistische Analyse

Die Daten wurden mittels deskriptiver Statistik untersucht. Das Zehn-Jahres-Überleben wurde mithilfe der Kaplan-Meier-Methode berechnet.<sup>42</sup> Die Komplikationen und

die entsprechenden Zeiträume bis zum Eintreten des Ereignisses wurden ebenfalls berücksichtigt. Die untersuchten Komplikationen waren Gerüstfrakturen, Chipping der Verblendkeramik, Karies, Randspalten und Vitalitätsverlust. Die Daten der Patienten, die innerhalb von zehn Jahren keine Komplikationen gezeigt hatten, wurden zum letzten Beobachtungszeitpunkt zensiert. Dies machte die Untersuchung der Überlebensraten der Brücken und Zirkoniumdioxid-Gerüste sowie der Verlustbeziehungsweise Ausfallraten im Hinblick auf technische und biologische Komplikationen möglich (Chipping, Karies, Randspaltbildung und Vitalität der Pulpa). Zusätzlich wurden die Zusammenhänge zwischen der Anzahl der Brückenglieder und dem Randschluss beziehungsweise dem Chipping untersucht und sowohl durch den Logrank-Test als auch durch die Cox-Regressionsanalyse verifiziert. Die mittels Cox-Regression ermittelte Hazard ratio lieferte ein interpretierbares Maß wie stark Einflussvariablen und Überleben zusammenhängen. Mit multiplen Regressionsanalysen, die Zufallseffekte berücksichtigten, wurde eine Längsschnittuntersuchung folgender Parameter durchgeführt:

- Auftreten und Schweregrad von Komplikationen (Gerüstfraktur, Chipping, Randundichtigkeit, okklusale Abnutzung)
- parodontale Parameter (Sondierungstiefe, Rezessionsbildung, Blutung nach Sondieren, Plaqueindizes)

Analysiert wurden zehn Jahre, die nach Anzahl der Glieder, der Funktionsdauer, dem Alter des Patienten bei der Eingliederung und dem Geschlecht bereinigt waren. Zur Beurteilung des Zeitpunkts „10 Jahre“ wurde die relative Häufigkeit der Patientenzufriedenheit mit der Brücke und der Komplikationen berechnet. Die untersuchten Komplikationen waren Gerüstfrakturen, Chipping der Verblendkeramik, Karies, Randspaltbildung, okklusale Abnutzung und Vitalitätsverlust. Darüber hinaus wurden die Unterschiede der parodontalen Parameter zwischen den Test- und den Kontrollzähnen analysiert.

## Ergebnisse

### Überlebens- und Komplikationsrate der Brücken über zehn Jahre

Einundzwanzig Patienten (9 Frauen, 12 Männer) mit 26 Brücken auf Zirkoniumdioxidbasis wurden über eine mittlere Beobachtungsdauer von  $10,7 \pm 1,3$  Jahren

## Results

### 10-year survival and complication rates of the FDPs – longitudinal observations

Twenty-one patients (9 female, 12 male) with 26 zirconia-based FDPs were examined after a mean observation period of  $10.7 \pm 1.3$  years (Table 3). The mean age of the patients was  $48.3 \pm 10$  years.

Of the 26 FDPs, 20 were three-unit FDPs, 5 were four-unit and one was a five-unit FDP. Sixteen FDPs were located in the mandibles and 10 in the maxillas of the patients.

A total of 31 of the initial 57 FDPs (54.4%) could not be examined at the 10-year recall visit. Sixteen patients with 16 FDPs were lost to follow-up for various reasons during the 10-year study period (Table 3). Furthermore, 15 FDPs in 15 patients had to be replaced during the entire study period due to technical and/or biological complications (Table 3). One patient with 3 FDPs was not available for the 3-year and 5-year examinations (“lost to follow-up”), but attended the 10-year follow-up visit. Another patient with 1 FDP was counted as “lost to follow-up” at the 5-year evaluation, but was also available for the 10-year recall visit. In 5 patients, 5 FDPs had to be replaced, however, the same patients were examined at 10 years because they had one further zirconia-based study FDP under risk. Two patients, however, who lost one FDP during the study but had another one still in function, were not willing to come to the 10-year examination.

### FDP survival

During the entire study period, 3 fractures of zirconia frameworks had occurred. All framework fractures were thoroughly analyzed for the reason of failure. One fracture occurred through a connector area of a 5-unit maxillary FDP at 3 years and 2 months of clinical service. This fracture had occurred due to trauma. The incident has been described elsewhere in more detail.<sup>34</sup> The second fracture happened through the central connector of a 4-unit mandibular FDP at 6 years of clinical service. The analysis of the fractured area revealed that the size and the shape of the connector area had not been appropriately designed,<sup>43,44</sup> and fatigue was assumed as main reason for failure (Fig 1). The third fracture occurred at 8 years and 1 month of service at the distal crown of a mandibular 3-unit FDP (Figs 2a and 2b). The location of failure was atypical. The defect was presumably iatrogenically caused. The analysis of the reasons revealed that in the area of crack initiation, the occlusal and functional contacts had been adjusted extensively down to



Table 3 Summary of the number of patients and FDPs examined, replaced or lost to follow-up at each assessment over the 10 years of observation.

Tab. 3 Zusammenfassung der untersuchten Patienten und der Brücken, die ersetzt wurden oder nicht zur Nachbeobachtung zur Verfügung standen, im Beobachtungszeitraum von zehn Jahren.

	Available for examination zur Untersuchung erschienen/ verfügbar		Not available for examination nicht zur Untersuchung erschienen/ verfügbar			
	No. of patients Patienten (n)	No. of FDPs Brücken (n)	No. of patients (lost and replaced FDPs) Patienten (n) (nicht erschienen und Ersatz der Brücke)	Lost to follow-up nicht zur Nachuntersuchung erschienen	Replaced (before examination) Ersatz (vor der Untersuchung)	
				Reasons for loss of follow-up Gründe für Ausscheiden aus Studie	No. of FDPs Brücken (n)	No. of FDPs Brücken (n)
<b>Baseline</b>	45	57				
<b>2 years</b> 2 Jahre	37	49	8	Refused to come or moved away Erscheinen verweigert oder verzogen	8	0
<b>3 years</b> 3 Jahre	36	46	9	1 passed away / 8 refused or moved away 1 verstorben, 8 Erscheinen verweigert oder verzogen	11	0
<b>5 years</b> 5 Jahre	27	33	18	1 passed away / 10 refused or moved away 1 verstorben, 10 Erscheinen verweigert oder verzogen	17	7
<b>10 years</b> 10 Jahre	21	26	24	3 passed away / 13 refused or moved away 3 verstorben, 13 Erscheinen verweigert oder verzogen	16	15

the framework material at the time of cementation. Hence, the zirconia surface was exposed to the oral cavity for years. It may be assumed that the aging of the ceramic was accelerated by moisture and the functional tooth contacts and, thus, fatigue caused the fracture.

Considering these catastrophic failures, the estimated 10-year survival rate of the zirconia frameworks was 91.5% (Kaplan-Meier survival statistics) (Fig 3). Due to the high number of FDPs that had to be replaced for reasons other than fracture, however, the estimated overall 10-year survival rate of the FDPs was only 67% (Kaplan Meier).

Most of the failures occurred for technical and/or biological reasons and happened during the first 5 years of clinical service (Table 4). In the following years (years 5 to 10), only 3 more FDPs had to be replaced. Two of those FDPs had failed because of the already mentioned framework fractures. One more FDP failed due to secondary caries (Table 4).

#### Technical complications

Chipping of the veneering ceramic was found on 16 FDPs during the entire study period of 10 years, resulting in a

untersucht (Tab. 3). Das mittlere Alter der Patienten betrug  $48,3 \pm 10$  Jahre.

Von den 26 Brücken waren 20 drei-, fünf vier- und eine fünfgliedrig. Insgesamt befanden sich 16 Brücken im Unterkiefer und zehn im Oberkiefer der Patienten.

Insgesamt 31 der anfänglich 57 Brücken (54,4 %) konnten beim Nachbeobachtungstermin nach zehn Jahren nicht untersucht werden. 16 Patienten mit 16 Brücken standen aus unterschiedlichen Gründen innerhalb der zehnjährigen Studiendauer nicht mehr zur Nachbeobachtung zur Verfügung (Tab. 3). Außerdem mussten im Verlauf der gesamten Studiendauer 15 Brücken bei 15 Patienten aufgrund technischer beziehungsweise biologischer Komplikationen ersetzt werden (Tab. 3).

Ein Patient mit drei Brücken stand für die Nachuntersuchung nach drei und nach fünf Jahren nicht zur Verfügung, erschien aber zum Nachbeobachtungstermin nach zehn Jahren. Ein weiterer Patient mit einer Brücke erschien bei der Fünf-Jahres-Untersuchung nicht zur Nachbeobachtung, stand aber zum Recall nach zehn Jahren ebenfalls wieder zur Verfügung. Bei fünf Patienten mussten insgesamt fünf



Fig 1 Fracture through the central connector of a 4-unit mandibular FDP at 6 years of clinical service. Size and the shape of the connector area had not been appropriately designed.

Abb. 1 Fraktur durch ein Zwischenglied bei einer viergliedrigen UK-Brücke nach sechs Jahren unter Funktion. Größe und Form des Zwischenglieds waren nicht adäquat konstruiert.



Brücken ersetzt werden. Diese Patienten wurden jedoch ebenfalls nach zehn Jahren untersucht, da sie eine weitere Brücke mit Zirkoniumdioxid-Gerüst im Rahmen der Studie erhalten hatten, für die ein Risiko bestand. Zwei Patienten, bei denen es im Verlauf der Studie zum Verlust einer Brücke kam, bei denen aber eine weitere in Funktion verblieb, waren nicht bereit, zur Zehn-Jahres-Untersuchung zu erscheinen.

### Überleben der Brücken

Während der gesamten Studiendauer kam es zu drei Frakturen von Zirkoniumdioxid-Gerüsten. Bei allen Gerüstfrakturen wurden die Ursachen für das Versagen gründlich analysiert. Eine Fraktur entstand nach drei Jahren und zwei Monaten bei einer fünfgliedrigen Oberkiefer (OK)-Brücke durch den Zwischengliedbereich. Diese Fraktur war durch ein Trauma verursacht. Das Ereignis wurde an anderer Stelle genauer beschrieben.<sup>34</sup> Die zweite Fraktur ereignete sich durch das zentrale Zwischenglied einer viergliedrigen Unterkiefer (UK)-Brücke nach sechs Jahren klinischer Anwendung. Die Analyse des Frakturbereichs ergab, dass die Größe und Form des Zwischenglieds nicht adäquat konstruiert waren<sup>43,44</sup>, weshalb Ermüdung als Hauptursache für das Versagen vermutet wird (Abb. 1). Die dritte Fraktur geschah nach acht Jahren und einem Monat in Funktion an der distalen Krone einer dreigliedrigen UK-Brücke (Abb. 2a und 2b). Die Lokalisation der Fraktur war untypisch. Der Defekt war vermutlich iatrogener Ursache. Die Analyse ergab, dass im Bereich der Rissentstehung die Okklusalkontakte und Funktionskontakte zum Zeitpunkt der Eingliederung weit in das Gerüstmaterial hinein eingeschliffen worden waren. Daher war die Zirkoniumdioxid-Oberfläche über Jahre dem Milieu der Mundhöhle ausgesetzt. Es ist anzunehmen, dass die Alterung der Keramik durch die Feuchtigkeit und die

10-year complication rate for chipping of 32%. At the 5-year examination, chipping was found in 7 FDPs (Table 5).<sup>34</sup> At the 10-year recall, 9 additional FDPs exhibited a chipping of the veneering ceramic. In 25.7% of the 3-unit FDPs and in 50% of the 4- or 5-unit-FDPs, chipping of different degrees (USPHS criteria B or C) had occurred (Fig 4). Interestingly, a significant correlation of the span of the FDPs (3- to 5-unit) and the incidence of chipping was observed. A 4.9 times higher probability for chipping of the veneering ceramic (hazard ratio 4.9; 95% CI: 1.5, 15.6;  $p = 0.008$ ) was found for 4- and 5-unit FDPs than for 3-unit FDPs.

Furthermore, an increase in chipping was found in relation to the duration of clinical service – the longer the clinical service time of the FDP, the higher the risk for chipping ( $p < 0.001$ , multiple mixed effects regression model). Finally, the span of the FDP had no influence on the extent of the chipping (USPHS criteria B vs C, D).

Marginal discrepancy/degradation (Fig 5) (USPHS rating B or C) was found in 39 FDPs during the 10 years of observation. The 10-year complication rate for marginal discrepancy was 90.7% (Table 5).

No influence of the number of FDP units on the marginal adaptation was found: marginal adaptation degraded in 80% of the 3-unit FDP and 78.6% of the 4- or 5-unit FDPs. Time had a significant influence on the degradation of the marginal regions. Marginal discrepancies were found more frequently the longer the clinical service time was ( $p < 0.001$ , multiple mixed effects regression models).

### Biological complications

Secondary caries occurred in 11 FDPs during the 10 years of service, resulting in a complication rate of 27%. Interestingly, these problems mainly developed in the first 5 years of service. Ten out of 11 cases with secondary caries were already reported after 5 years.<sup>34</sup> Only one additional case



Fig 2a Fracture occurred at 8 years and 1 month of service at the distal crown of a mandibular 3-unit FDP.

Abb. 2a Nach acht Jahren und einem Monat in Funktion an der distalen Krone einer dreigliedrigen UK-Brücke aufgetretene Fraktur.

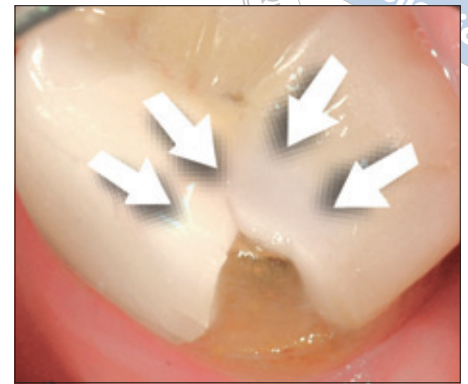


Fig 2b In the area of crack initiation, the occlusal and functional contacts had been adjusted extensively down to the framework material at time of cementation (white arrows).

Abb. 2b Im Bereich der Rissentstehung waren die Okklusal- und Funktionskontakte zum Zeitpunkt der Eingliederung weit in das Gerüstmaterial hinein eingeschliffen worden (weiße Pfeile).

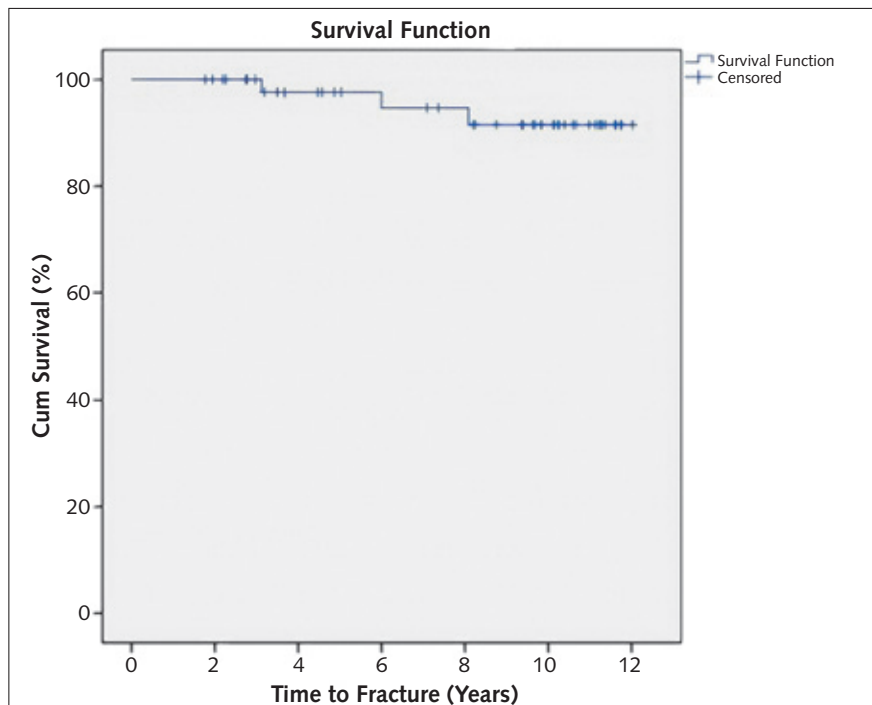


Fig 3 Kaplan-Meier curve of the framework fracture events in relation to time.

Abb. 3 Kaplan-Meier-Kurve der Gerüstfrakturereignisse über die Zeit.

was found later. This secondary caries was detected at 6 years and 6 months of service (Table 5).

Loss of vitality occurred on one abutment tooth in 1 FDP. Two further FDPs showed a delayed positive reaction. The 10-year complication rate for loss of vitality was thus 4%.

#### Periodontal parameters

No significant difference of the periodontal parameters PPD, PCR and BOP were found between test and control teeth. Furthermore, no significant changes of the

funktionellen Zahnkontakte beschleunigt wurde und die Fraktur daher durch Ermüdung bedingt war.

Unter Berücksichtigung dieser katastrophalen Misserfolge lag die berechnete Zehn-Jahres-Überlebensrate der Zirkoniumdioxid-Gerüste bei 91,5 % (Kaplan-Meier-Überlebensstatistik) (Abb. 3). Aufgrund der hohen Anzahl von Brücken, die aus anderen Ursachen als Frakturen ersetzt werden mussten, betrug die berechnete Zehn-Jahres-Überlebensrate der Brücken insgesamt nur 67 % (Kaplan-Meier).

Table 4 Overview of all replaced FDPs: reason (complication) for the replacement and number of months the FDP was in function until replacement.

Tab. 4 Übersicht über alle ersetzten Brücken: Ursachen (Komplikation) für den Ersatz und Zahl der Monate, über die die Brücke bis zum Ersatz in Funktion war.

Follow-up Nachuntersuchung		3 years <sup>36</sup> 3 Jahre <sup>36</sup>		5 years <sup>34</sup> 5 Jahre <sup>34</sup>		10 years 10 Jahre		Total replaced FDPs ersetzte Brücken gesamt
		No. of replaced FDPs ersetzte Brücken (n)	Time in function (months) Zeit in Funktion (Monate)	No. of replaced FDPs ersetzte Brücken (n)	Time in function (months) Zeit in Funktion (Monate)	No. of replaced FDPs ersetzte Brücken (n)	Time in function (months) Zeit in Funktion (Monate)	
Technical technisch	Fracture of framework Gerüstfraktur	0		1	38	2	72 / 97	3
	Severe chipping starkes Chipping	1	38	0		0		1
	Loss of retention Retentionsverlust	1	33	0		0		1
Biological biologisch	Secondary caries due to marginal discrepancy Sekundärkaries aufgrund von Randspalten	3	44*, 23, 33	2	54, 60	1	69	5
	Apical otitis apikale Otitis	1	41	1	58	0		2
	Fracture of abutment tooth Fraktur des Pfeilerzahns	1	21	1	53	0		2
Total complications Komplikationen gesamt		7		5		3		15

\*Unsealed marginal areas due to faulty cementation led to caries over time.

For details about the replacements until the 3- and the 5-year follow-up examinations, see Sailer et al.<sup>34,36</sup>

\* Unversiegelte Randbereiche aufgrund fehlerhafter Zementierung führten mit der Zeit zu Karies. Genauere Informationen zu den ersetzten Brücken in der Zeit bis zu den Untersuchungen nach drei und fünf Jahren finden sich in Sailer et al.<sup>34,36</sup>

Die meisten Verluste hatten technische beziehungsweise biologische Ursachen und ereigneten sich innerhalb der ersten fünf Jahre in Funktion (Tab. 4). In den folgenden Jahren (Jahre 5–10) mussten nur noch drei weitere Brücken ersetzt werden. Zwei dieser Brücken hatten aufgrund der bereits erwähnten Gerüstfrakturen versagt. Eine weitere versagte aufgrund von Sekundärkaries (Tab. 4).

parameters occurred over time, neither for the test nor for the control teeth.

Both test and control teeth developed recessions (statistically significant change of PAL) over time (test:  $p < 0.001$ , mixed models; control:  $p < 0.001$ , multiple mixed effects regression models). The mean increase in recessions over 10 years was significantly higher for test (0.7; 95% CI: 0.5, 0.9) than for control teeth (0.46; 95% CI: 0.2, 0.6).

No influence of the age and gender of the patients on any of the evaluated factors was found.

Tab. 5 Kumulative Drei-, Fünf- und Zehn-Jahres-Überlebensraten, Anzahl der Chipping-Ereignisse, Auftreten von Randspalten und Sekundärkaries über den gesamten Beobachtungszeitraum gerechnet.

### Frequency of complications at the 10-year follow-up

No differences of the periodontal parameters PPD, PCR, PAL and BOP were found in test and control teeth, nor was caries detected.

The overall survival rate of the zirconia-based FDPs, however, was lower than that of the frameworks (67% vs 91.5%). During the 10 years of observation, several FDPs had to be

Ein Chipping der Verblendkeramik wurde über den gesamten Studienverlauf von zehn Jahren bei 16 Brücken festgestellt, was eine Zehn-Jahres-Komplikationsrate von 32 % für das Chipping ergibt. Zum Zeitpunkt der Untersuchung nach fünf Jahren wurde bei sieben Brücken Chipping festgestellt.<sup>34</sup> Beim Recall nach zehn Jahren wiesen neun weitere Brücken Abplatzungen der Verblendkeramik auf (Tab. 5). Bei 25,7 % der dreigliedrigen und bei 50 % der vier- oder fünfgliedrigen Brücken kam es zum Chipping verschiedener Schweregrad (B oder C nach USPHS-Kriterien) (Abb. 4). Interessanterweise wurde eine signifikante Korrelation zwischen der Spanne der Brücken (drei- bis fünfgliedrig) und der Inzidenz an Chipping beobachtet. Für die vier- und fünfgliedrigen Brücken wurde eine 4,9-mal höhere Wahrscheinlichkeit für ein Abplatzen der Verblendkeramik festgestellt (Hazard ratio 4,9; 95 % KI: 1,5; 15,6;  $p = 0,008$ ) als für die dreigliedrigen. Außerdem nahm das Chipping im Verhältnis zur Dauer der klinischen Funktion zu: Je länger die Brücke in Funktion gewesen war, umso höher war das Risiko des Chippings ( $p < 0,001$ ; multiple Regressionsanalyse mit Zufallseffekten). Auf das Ausmaß des Chippings hatte die Spannweite der Brücke keinen Einfluss (B gegenüber C, D nach USPHS-Kriterien).



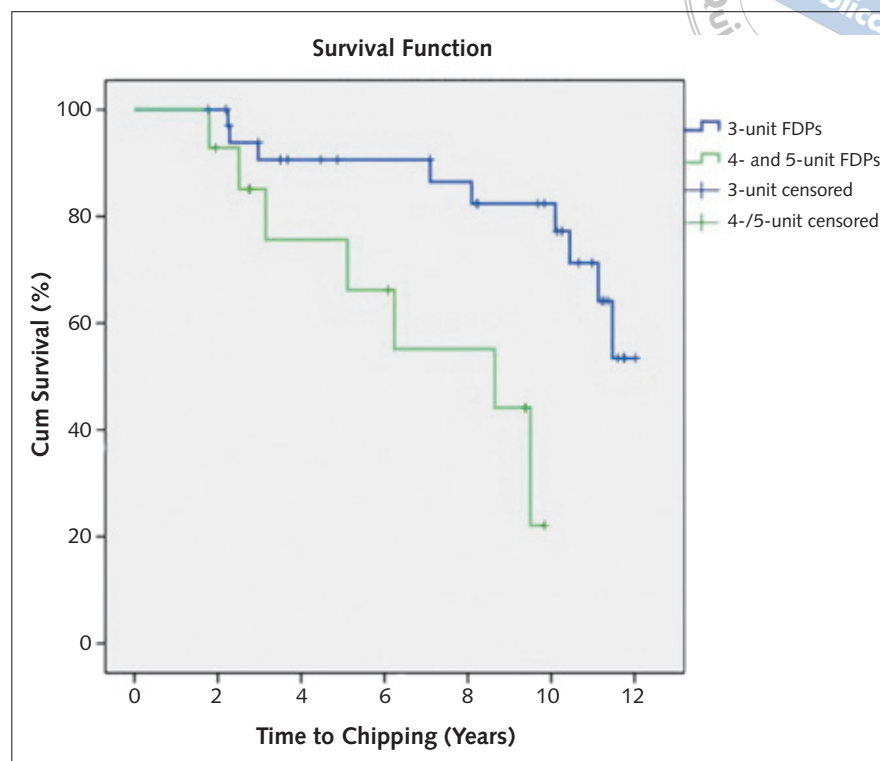


Fig 4 Kaplan-Meier curve of the chipping/fracture of the veneering ceramic of the FDPs in relation to time. All degrees of chipping (USPHS: B, C, and D) were categorized as events. The blue line shows the survival function of the 3-unit FDPs and the green line the survival function of the longer-span FDPs.

Abb. 4 Kaplan-Meier-Kurve der Ereignisse Chipping/ Fraktur der Verblendkeramik der Brücken über die Zeit. Alle Schweregrade des Chippings (USPHS-Bewertungen B, C, und D) wurden als Ereignis eingestuft. Die blaue Kurve zeigt die Überlebensfunktion der dreigliedrigen Brücken und die grüne Linie die Überlebensfunktion der länger-spannigen Brücken.

Eine Randspaltbildung (Abb. 5) (Wertung B oder C nach USPHS-Kriterien) wurde während der zehnjährigen Beobachtungsdauer bei 39 Brücken festgestellt. Die Zehn-Jahres-Komplikationsrate für Randspalten lag bei 90,7 % (Tab. 5).

Die Zahl der Brückenglieder beeinflusste den Randschluss nicht: Der Randschluss verschlechterte sich bei 80 % der dreigliedrigen und bei 78,6 % der vier- bis fünfgliedrigen Brücken. Der Faktor Zeit hatte einen signifikanten Einfluss auf die Spaltbildung an den Rändern. Randspalten wurden umso häufiger festgestellt, je länger die Brücke in Funktion war ( $p < 0,001$ ; multiple Regressionsanalyse mit Zufallseffekten).

### Biologische Komplikationen

Sekundärkaries trat innerhalb von zehn Jahren unter Funktion bei elf Brücken auf, was einer Komplikationsrate von 27 % entspricht. Diese Schwierigkeiten entstanden hauptsächlich innerhalb der ersten fünf Jahre unter Funktion. Von zehn der elf Fälle von Sekundärkaries war schon nach fünf Jahren berichtet worden.<sup>34</sup> Nur ein weiterer Fall wurde später festgestellt. Diese Sekundärkaries wurde nach 6,5 Jahren unter Funktion entdeckt (Tab. 5).

Bei einer Brücke trat ein Vitalitätsverlust an einem

removed due to insufficient marginal accuracy and resulting secondary caries. These issues were predominantly associated with the fact that the CAM procedure was at the prototype stage.

Among the technical and/or biological complications found associated with the surviving FDPs, chipping/fracture of the veneering ceramic was the main technical complication. This problem was found in more than 30% of the FDPs. The second most frequent technical complication was marginal inaccuracy and marginal degradation, promoting the development of secondary caries over time.

The excellent performance of the zirconia frameworks during long-term clinical loading in the present study supports the findings of laboratory studies on the long-term stability of zirconia.<sup>10,15,18,45</sup> Due to its high fracture toughness, this ceramic exceeded the outcomes of all other ceramics used for FDPs.<sup>6,29,30,32</sup> Furthermore, the present results also indicate that zirconia might be a valid ceramic alternative to metal for the fabrication of FDP frameworks. A recent systematic review showed similar survival rates of zirconia-based and metal-based FDPs at 3 years of clinical function.<sup>28</sup> The present study indicates that also at longer observation periods, no differences of the outcomes of zirconia-based and metal-based FDPs might be expected.



Fig 5a At baseline a white cementation line can be observed at the margin.

Abb. 5a Bei Baseline ist im Randbereich eine weiße Zementlinie zu erkennen.



Fig 5b At 8 years in function, a marginal degradation occurred, visible as a dark line at the margin.

Abb. 5b Nach acht Jahren unter Funktion war es zu einem Verlust des Randschlusses gekommen (dunkle Linie am Brückenrand).

Randomized controlled clinical long-term studies, however, are needed to support this assumption.

The zirconia framework fractures observed in the present study were not primarily associated with fatigue. The analysis of the 3 fractured reconstructions revealed that trauma,<sup>34</sup> insufficient framework dimensions (technical problem), and damage of the ceramic surface due to extensive grinding (clinical problem) were significant co-factors promoting the fractures. Generally, the shape and dimensions of the zirconia FDP frameworks influence the outcomes. It has been reported before that the gingival area of the connectors is the "locus minoris resistentiae" in ceramic FDPs.<sup>13,43,46–48</sup> In this area, high tensile stress occurs during occlusal function. The main problem is that ceramics are weak under tensile load because of their brittleness,<sup>49</sup> therefore the risk of fracturing increases with load.<sup>13,14</sup> Hence, the first fracture observed in the present study probably happened due to the excessive load during the trauma.

Furthermore, laboratory studies show that the stability of multi-unit zirconia FDP frameworks is significantly influenced by the shape and size of the connectors.<sup>13,18,44</sup> In one study testing different shapes of connectors, that is, the radius of the curvature at the gingival and occlusal embrasure (0.25 mm vs 0.9 mm), and their effect on the stability, the highest stability was found when the radius of the gingival embrasure was 0.9 mm.<sup>43</sup> According to these findings, one of the fractured frameworks in this study was not appropriately designed. The cross section of the connector was circular, not elliptic, and the connector diameter exhibited lower dimensions (Fig 1) as was recommended

Pfeilerzahn auf. Zwei weitere Brücken zeigten eine verzögerte, positive Reaktion auf die Vitalitätsprüfung. Die Zehn-Jahres-Komplikationsrate in Bezug auf den Vitalitätsverlust betrug 4 %.

#### Periodontale Parameter

Es wurden keine signifikanten Unterschiede der periodontalen Parameter Sondierungstiefe, Plaquestatus und Blutung nach Sondieren zwischen Test- und Kontrollzähnen festgestellt. Außerdem kam es weder bei den Test- noch bei den Kontrollzähnen zu signifikanten Veränderungen dieser Parameter im Zeitablauf.

Es kam sowohl bei den Test- als auch bei den Kontrollzähnen mit der Zeit zu Rezessionen (statistisch signifikante Veränderung des Attachmentniveaus; Testzähne:  $p < 0,001$ ; Mischmodelle; Kontrollzähne:  $p < 0,001$ ; multiple Regressionsanalysen mit Zufallsvariablen). Der mittlere Anstieg der Rezessionen über zehn Jahre war bei den Testzähnen (0,7; 95 % KI: 0,5; 0,9) signifikant höher als bei den Kontrollzähnen (0,46; 95 % KI: 0,2; 0,6).

Das Alter und das Geschlecht der Patienten hatten keinen Einfluss auf die untersuchten Faktoren.

#### Häufigkeit von Komplikationen nach zehn Jahren

34,6 % der untersuchten Brücken ( $n = 9$ ) wiesen Abplatzungen der Verblendkeramik auf. Bei allen Brücken wurde eine Abnutzung der Okklusalfächen festgestellt. Die Analyse des Randschlusses ergab, dass nur zwei Brücken (7,7 %) keinen Randspalt aufwiesen (Tab. 6).

Table 6 USPHS rating of the FDPs at the 10-year recall: frequencies of occurrence by degree of severity for the complications chipping, framework fracture and marginal adaptation.

Tab. 6 USPHS-Bewertung der Brücken beim Recall nach zehn Jahren: Häufigkeit des Auftretens nach Schwierigkeitsgrad bei den Komplikationen Chipping, Gerüstfraktur und Randspalt.

	Framework fracture (%) Gerüstfraktur (%)	Chipping (%) Chipping (%)	Marginal adaptation (%) Randspalt (%)	Occlusal wear (%) okklusale Abnutzung (%)
Alpha	0	65.4 (n = 17)	7.7 (n = 2)	0
Bravo	0	15.4 (n = 4)	65.4 (n = 17)	84.6 (n = 22)
Charlie	0	19.2 (n = 5)	26.9 (n = 7)	15.4 (n=4)
Delta	0	0	0	0

Es wurden weder Unterschiede der periodontalen Parameter Sondierungstiefe, Plaquestatus, Attachmentniveau und Blutung nach Sondieren zwischen der Test- und der Kontrollgruppe festgestellt, noch Karies gefunden.

## Diskussion

Die vorliegende Studie zeigte eine sehr gute Leistung für Zirkoniumdioxid-Brückengerüste, die über lange Zeit in klinischer Funktion waren. Frakturen der Zirkoniumdioxid-Gerüste traten selten und hauptsächlich in Verbindung mit Trauma, inadäquaten Gerüstabmessungen (technischer Fehler) oder mit iatrogenen Beschädigung der Oberfläche (Beschleifen) auf.

Die Gesamtüberlebensrate der zirkoniumdioxidgestützten Brücken war niedriger als die der Gerüste (67 % vs. 91,5 %). Während der zehnjährigen Beobachtungsdauer mussten mehrere Brücken aufgrund eines unzureichenden Randschlusses und daraus resultierender Sekundärkaries entfernt werden. Diese Probleme hingen überwiegend damit zusammen, dass sich das CAM-Verfahren noch in der Erprobungsphase befand.

Unter den technischen beziehungsweise biologischen Komplikationen, die bei den verbliebenen Brücken auftraten, war das Chipping/ die Fraktur der Verblendkeramik die häufigste technische Komplikation. Dieses Problem trat bei über 30 % der Brücken auf. Die zweithäufigste technische Komplikation war die Ungenauigkeit beziehungsweise der Verlust der Integrität des Randschlusses, was mit der Zeit die Entwicklung einer Sekundärkaries begünstigte.

Die hervorragende Performance der Zirkoniumdioxid-Gerüste im Verlauf der klinischen Langzeitbelastung in der vorliegenden Studie stützt die Ergebnisse von Laborstudien zur Langzeitstabilität von Zirkoniumdioxid.<sup>10,15,18,45</sup>

in later studies.<sup>18</sup> It has been shown that the minimal size of the connectors for 4-unit FDPs should be 12.6 mm<sup>2</sup> (diameter 4 mm) to avoid failure over time.<sup>18</sup>

The third fracture was probably caused by cracks and crack propagation as a consequence of grinding. A laboratory study showed that microcracks were induced through grinding of the zirconia surface with diamond burs.<sup>50</sup>

The most frequently reported technical complication of zirconia-based reconstructions was chipping or extended fracture of the veneering ceramic, as substantiated by reviews of the literature.<sup>4,9,28</sup> Although the chipping rates varied widely in the published studies, this complication was found in most of the investigations.<sup>4,28</sup> In the present study, chipping was found in more than 30% of the FDPs, supporting the previous reports. Nevertheless, only one FDP had to be replaced due to this complication.<sup>38</sup> Most of the chippings were clinically polishable. Additionally, the observation period in the present study was double that of the other investigations. Increasing wear and roughness of the veneering ceramic during the course of clinical service might increase the risk of chipping. This needs to be confirmed by future studies.

Numerous investigations have focused on different factors that might influence the outcome of the zirconia veneering ceramic. For instance, different thermal expansion coefficients of core and veneering ceramic,<sup>51,52</sup> different surface processing techniques of zirconia,<sup>53,54</sup> and various manufacturing conditions have been analyzed.<sup>55–58</sup> Other investigations focused on the properties of the zirconia veneering ceramics,<sup>59,60</sup> the support of the veneering ceramic by the framework,<sup>61,62</sup> the influence of the thickness of veneering ceramic,<sup>63</sup> the span of FDPs,<sup>28</sup> and finally the aging of the veneering ceramics.<sup>64</sup> Unfortunately, the solution to these problems with zirconia veneering ceramic has not been found yet.



The present data indicate that the span of the FDP might have an impact on the risk of chipping. Long-span FDPs exhibited significantly a higher risk of chipping than short-span FDPs. More studies are needed to confirm this. One further risk factor for chipping may be occlusal wear/roughness of the veneering ceramic.<sup>65,66</sup> Thorough polishing of the ceramic surface at recall visits should be recommended, since they may reduce the risk of chipping.<sup>66</sup> Since the veneering ceramic used here was a prototype material, findings might not be transferrable to the veneering ceramics available nowadays. Hence, additional studies are needed to confirm these observations.

Finally, the problems with the accuracy observed in the present study were most likely associated with the insufficient accuracy of the prototype CAM system. Numerous investigations show that these initial problems have since been overcome. The CAD/CAM systems of today have improved with respect to precision. Several studies proved that the accuracy of current CAD/CAM reconstructions is clinically acceptable.<sup>67–70</sup> Furthermore, reconstructions made with CAD/CAM techniques exhibit an accuracy similar to that of the traditional metal-ceramic prostheses.<sup>70</sup>

## Conclusion

Based on the present data, the following conclusions can be drawn:

- Zirconia performed very well as a ceramic framework material for posterior FDPs at more than 10 years of function.
- Chipping/fracture of the veneering ceramic was the main technical complication. Further investigations should focus on the factors influencing the stability of the veneering ceramic in the oral environment over time.
- Long-span FDPs (4- and 5-unit) might have a higher risk for chipping than 3-unit FDPs. More studies are needed to verify this finding.
- Marginal discrepancies of the frameworks, occurring in this prototype system, are not representative of the CAD/CAM systems available today.

## Acknowledgments

This work was supported by the *Swiss Priority Program for Materials Research*. The investigators thank Dr. Malgorzata Roos, the biostatistician, for the statistical analysis of the data.

Aufgrund ihrer hohen Bruchzähigkeit übertraf dieser Keramikwerkstoff die Ergebnisse aller anderen für Brücken verwendeten Keramiken.<sup>6,29,30,32</sup> Zirkoniumdioxid könnte eine valide keramische Alternative zur Herstellung von Brückengerüsten aus Metall sein, wie die Ergebnisse dieser Studie zeigen. Eine aktuelle systematische Übersichtsarbeit ergab nach drei Jahren unter klinischer Funktion vergleichbare Überlebensraten für Brücken mit Zirkoniumdioxid- und mit Metallgerüst.<sup>28</sup> Die vorliegende Studie deutet an, dass sich auch bei längeren Beobachtungszeiträumen Brücken mit Zirkoniumdioxid- und Metallgerüst nicht unterscheiden. Es sind jedoch randomisierte, kontrollierte, klinische Langzeitstudien notwendig, um diese Annahme zu stützen.

Die Zirkoniumdioxid-Gerüstfrakturen in dieser Studie hingen primär nicht mit einer Materialermüdung zusammen. Die Analyse der drei frakturierten Rekonstruktionen ergab, dass Traumata<sup>34</sup>, eine nicht adäquate Dimensionierung des Gerüsts (technisches Problem) und eine durch tiefes Beschleifen beschädigte Keramikoberfläche (klinisches Problem) die signifikanten Kofaktoren bei der Entstehung der Frakturen waren. Im Allgemeinen beeinflussen die Form und die Dimensionen der Zirkoniumdioxid-Brückengerüste die Ergebnisse. Bereits früher wurde berichtet, dass die Gingivazone der Zwischenglieder die Schwachstelle keramischer Brücken sei.<sup>13,43,46–48</sup> In diesem Bereich kommt es unter funktioneller okklusaler Belastung zu hohen Zugbelastungen. Das Hauptproblem besteht darin, dass Keramiken aufgrund ihrer Sprödigkeit unter Zugbelastung schwach sind<sup>49</sup> und daher das Frakturrisiko mit der Belastung zunimmt.<sup>13,14</sup> Insofern rührte die erste in dieser Studie beobachtete Fraktur wahrscheinlich von der übermäßigen Belastung während des Traumas.

Laborstudien zeigen außerdem, dass die Stabilität von mehrgliedrigen Zirkoniumdioxid-Brückengerüsten signifikant von der Form und Größe der Zwischenglieder beeinflusst wird.<sup>13,18,44</sup> In einer Studie wurden verschieden geformte Zwischenglieder, d. h. der Radius der Krümmung an der gingivalen und der okklusalen Einziehung des Interdentalraums (0,25 mm verglichen mit 0,9 mm), und deren Auswirkung auf die Stabilität untersucht.<sup>43</sup> Es zeigte sich die höchste Stabilität, wenn der Radius der gingivalen Einziehung bei 0,9 mm lag. Gemäß diesen Ergebnissen war eines der frakturierten Gerüste in der vorliegenden Studie nicht adäquat konstruiert. Der Querschnitt des Zwischenglieds war nicht elliptisch, sondern kreisförmig und der Durchmesser des Zwischenglieds war geringer (Abb. 1) als in späteren Studien empfohlen.<sup>18</sup> Es wurde gezeigt, dass die minimale



Größe der Zwischenglieder bei viergliedrigen Brücken 12,6 mm<sup>2</sup> (Durchmesser 4 mm) betragen sollte, um eine mit der Zeit auftretende Fraktur zu verhindern.<sup>18</sup>

Die dritte Fraktur wurde wahrscheinlich von Rissen und der Rissausbreitung infolge des Beschleifens verursacht. In einer Laborstudie wurde gezeigt, dass beim Beschleifen von Zirkoniumdioxid-Oberflächen mit Diamantfräsern Mikrorisse entstanden.<sup>50</sup>

Die am häufigsten berichtete technische Komplikation bei Rekonstruktionen auf Zirkoniumdioxid-Basis waren das Chipping oder ausgedehnte Frakturen der Verblendkeramik, was auch von den Übersichtsarbeiten gestützt wird.<sup>4,9,28</sup> Wenngleich die Häufigkeit der Abplatzungen in den veröffentlichten Studien erheblich variierte, wurde diese Komplikation doch in den meisten Untersuchungen festgestellt.<sup>4,28</sup> In der vorliegenden Studie wurde bei über 30 % der Brücken Chipping festgestellt, was die früheren Berichte stützt. Dennoch musste nur eine Brücke aufgrund dieser Komplikation ersetzt werden.<sup>38</sup> Die meisten Abplatzungen ließen sich klinisch durch Polieren korrigieren. Außerdem war die Beobachtungsdauer in der vorliegenden Studie doppelt so lang wie die der anderen Untersuchungen. Eine fortschreitende Abnutzung und Rauigkeit der Verblendkeramik im Verlauf der klinischen Funktion könnte das Risiko von Abplatzungen erhöhen. Dies ist durch zukünftige Studien zu bestätigen.

Zahlreiche Untersuchungen haben sich mit den verschiedenen Faktoren befasst, die das Ergebnis im Hinblick auf die Verblendkeramik aus Zirkoniumdioxid beeinflussen könnten. So wurden zum Beispiel verschiedene Wärmeausdehnungskoeffizienten von Gerüst- und Verblendkeramik<sup>51,52</sup>, verschiedene Techniken der Oberflächenbearbeitung bei Zirkoniumdioxid<sup>53,54</sup> und unterschiedliche Herstellungsbedingungen<sup>55–58</sup> analysiert. Andere Forschungsarbeiten befassten sich mit den Eigenschaften von Verblendkeramiken aus Zirkoniumdioxid<sup>59,60</sup>, der Unterstützung der Verblendkeramik durch das Gerüst<sup>61,62</sup>, dem Einfluss der Schichtstärke der Verblendkeramik<sup>63</sup>, der Spanne der Brücken<sup>28</sup> und schließlich mit der Alterung der Verblendkeramiken<sup>64</sup>. Leider konnte die Lösung dieser Probleme mit Verblendkeramiken für Zirkoniumdioxid noch nicht gefunden werden.

Die vorliegenden Daten deuten darauf hin, dass die Spanne der Brücke einen Einfluss auf das Chipping-Risiko haben könnte. Langspannige Brücken zeigten ein signifikant höheres Risiko von Chipping als kurzspannige Brücken. Um dies zu bestätigen, sind weitere Studien notwendig. Ein weiterer Risikofaktor für das Chipping könnte in der

okklusalen Abnutzung/ Rauigkeit der Verblendkeramik liegen.<sup>65,66</sup> Es ist eine gründliche Politur der Keramikoberfläche bei Recall-Sitzungen zu empfehlen, da dies das Risiko des Chipping reduzieren könnte.<sup>66</sup> Da die hier verwendete Verblendkeramik ein Prototyp war, sind die Ergebnisse möglicherweise nicht auf die heute erhältlichen Verblendkeramiken übertragbar. Daher sind weitere Studien notwendig, um diese Beobachtungen zu bestätigen. Die in der vorliegenden Studie problematische Passgenauigkeit hing höchstwahrscheinlich mit der unzureichenden Genauigkeit des CAM-System-Prototypen zusammen. Zahlreiche Untersuchungen zeigen, dass diese anfänglichen Probleme mittlerweile gelöst wurden. Die heutigen CAD/CAM-Systeme wurden im Hinblick auf die Präzision verbessert. Mehrere Studien belegen, dass die Genauigkeit der aktuellen CAD/CAM-Rekonstruktionen klinisch akzeptabel ist.<sup>67–70</sup> Außerdem weisen Rekonstruktionen, die mit CAD/CAM-Techniken hergestellt wurden, eine Genauigkeit auf, die der von herkömmlichen metallkeramischen Prothesen entspricht.<sup>70</sup>

## Schlussfolgerung

Auf Grundlage der vorliegenden Daten können folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

- Zirkoniumdioxid wies als keramisches Gerüstmaterial für Brücken im Seitenzahnbereich bei über zehn Jahren unter Funktion eine gute Leistung auf.
- Chipping / Frakturen der Verblendkeramik waren die häufigste technische Komplikation. Weitere Untersuchungen sollten sich auf die Faktoren konzentrieren, welche die Stabilität der Verblendkeramik im Milieu der Mundhöhle im Zeitverlauf beeinflussen.
- Langspannige (vier- und fünfgliedrige) Brücken könnten ein höheres Risiko des Chippings aufweisen als dreigliedrige Brücken. Um dies zu verifizieren, sind weitere Studien notwendig.
- Randspalten der Gerüste, die in diesem in der Erprobung befindlichen System auftraten, sind nicht repräsentativ für die heute erhältlichen CAD/CAM-Systeme.

## Danksagung

Diese Arbeit wurde vom *Swiss Priority Program for Materials Research* gefördert. Die Untersucher danken Dr. Malgorzata Roos, Biostatistikerin, für die statistische Analyse der Daten.

## References

- McLean JW. Evolution of dental ceramics in the twentieth century. *J Prosthet Dent* 2001;85:61–66.
- Pjetursson BE, Tan K, Lang NP, Bragger U, Egger M, Zwahlen M. A systematic review of the survival and complication rates of fixed partial dentures (FPDs) after an observation period of at least 5 years. *Clin Oral Implants Res* 2004;15:625–642.
- Tan K, Pjetursson BE, Lang NP, Chan ES. A systematic review of the survival and complication rates of fixed partial dentures (FPDs) after an observation period of at least 5 years. *Clin Oral Implants Res* 2004;15:654–666.
- Schley JS, Heussen N, Reich S, Fischer J, Haselhuhn K, Wolfart S. Survival probability of zirconia-based fixed dental prostheses up to 5 yr: a systematic review of the literature. *Eur J Oral Sci* 2010;118:443–450.
- Raigrodski AJ. Contemporary materials and technologies for all-ceramic fixed partial dentures: a review of the literature. *J Prosthet Dent* 2004;92:557–562.
- Vult von Steyern P. All-ceramic fixed partial dentures. Studies on aluminum oxide- and zirconium dioxide-based ceramic systems. *Swed Dent J Suppl* 2005;1–69.
- Lüthy H. Strength and toughness of dental ceramics. In: Mörmann WH (ed). *CAD/CIM in Aesthetic Dentistry*. Chicago: Quintessence, 1996:229–239.
- Sailer I, Pjetursson BE, Zwahlen M, Hammerle CH. A systematic review of the survival and complication rates of all-ceramic and metal-ceramic reconstructions after and observation period of at least 3 years. Part II: fixed dental prostheses. *Clin Oral Impl Res* 2007;18:86–96.
- Al-Amleh B, Lyons K, Swain M. Clinical trials in zirconia: a systematic review. *J Oral Rehabil* 2010;37:641–652.
- Studart AR, Filser F, Kocher P, Gauckler LJ. In vitro lifetime of dental ceramics under cyclic loading in water. *Biomaterials* 2007;28:2695–2705.
- Piconi C, Maccauro G. Zirconia as a ceramic biomaterial. *Biomaterials* 1999;20:1–25.
- Christel P, Meunier A, Heller M, Torre JP, Peille CN. Mechanical properties and short-term in-vivo evaluation of yttrium-oxide-partially-stabilized zirconia. *J Biomed Mater Res* 1989;23:45–61.
- Lüthy H, Filser F, Loeffel O, Schumacher M, Gauckler LJ, Hammerle CH. Strength and reliability of four-unit all-ceramic posterior bridges. *Dent Mater* 2005;21:930–937.
- Tinschert J, Natt G, Mautsch W, Augthun M, Spiekermann H. Fracture resistance of lithium disilicate-, alumina-, and zirconia-based three-unit fixed partial dentures: a laboratory study. *Int J Prosthodont* 2001;14:231–238.
- Att W, Grigoriadou M, Strub JR. ZrO<sub>2</sub> three-unit fixed partial dentures: comparison of failure load before and after exposure to a mastication simulator. *J Oral Rehabil* 2007;34:282–290.
- Filser F, Kocher P, Weibel F, Lüthy H, Schärer P, Gauckler LJ. Reliability and strength of all-ceramic dental restorations fabricated by direct ceramic machining (DCM). *Int J Comput Dent* 2001;4:89–106.
- Filser F, Lüthy H, Kocher P, Schärer P, Gauckler L. High load bearing, high reliable all-ceramic dental bridges by the direct ceramic machining process. *European Cells and Materials* 2001;1:7–8.
- Studart AR, Filser F, Kocher P, Gauckler LJ. Fatigue of zirconia under cyclic loading in water and its implications for the design of dental bridges. *Dent Mater* 2007;23:106–114.
- Sailer I, Gottnerb J, Kanelb S, Hammerle CH. Randomized controlled clinical trial of zirconia-ceramic and metal-ceramic posterior fixed dental prostheses: a 3-year follow-up. *Int J Prosthodont* 2009;22:553–560.
- Schmitt J, Holst S, Wichmann M, Reich S, Gollner M, Hamel J. Zirconia posterior fixed partial dentures: a prospective clinical 3-year follow-up. *Int J Prosthodont* 2009;22:597–603.
- Beuer F, Edelhoff D, Gernet W, Sorensen JA. Three-year clinical prospective evaluation of zirconia-based posterior fixed dental prostheses (FDPs). *Clin Oral Investig* 2009;13:445–451.
- Edelhoff D, Florian B, Florian W, Johnen C. HIP zirconia fixed partial dentures-clinical results after 3 years of clinical service. *Quintessence Int* 2008;39:459–471.
- Raigrodski AJ, Chiche GJ, Potiket N, Hochstedler JL, Mohamed SE, Billiot Set al. The efficacy of posterior three-unit zirconium-oxide-based ceramic fixed partial dental prostheses: a prospective clinical pilot study. *J Prosthet Dent* 2006;96:237–244.
- Tinschert J, Schulze KA, Natt G, Latzke P, Heussen N, Spiekermann H. Clinical behavior of zirconia-based fixed partial dentures made of DC-Zirkon: 3-year results. *Int J Prosthodont* 2008;21:217–222.
- Molin MK, Karlsson SL. Five-year clinical prospective evaluation of zirconia-based Denzir 3-unit FPDs. *Int J Prosthodont* 2008;21:223–227.
- Christensen RP, Ploeger BJ. A clinical comparison of zirconia, metal and alumina fixed-prosthesis frameworks veneered with layered or pressed ceramic: a three-year report. *J Am Dent Assoc* 2010;141:1317–1329.
- Wolfart S, Harder S, Eschbach S, Lehmann F, Kern M. Four-year clinical results of fixed dental prostheses with zirconia substructures (Cercon): end abutments vs. cantilever design. *Eur J Oral Sci* 2009;117:741–749.
- Heintze SD, Rousson V. Survival of zirconia- and metal-supported fixed dental prostheses: a systematic review. *Int J Prosthodont* 2010;23:493–502.
- Vult von Steyern P, Jonsson O, Nilner K. Five-year evaluation of posterior all-ceramic three-unit (In-Ceram) FPDs. *Int J Prosthodont* 2001;14:379–384.

30. Olsson KG, Furst B, Andersson B, Carlsson GE. A long-term retrospective and clinical follow-up study of In-Ceram Alumina FPDs. *Int J Prosthodont* 2003;16:150–156.
31. Zimmer D, Gerds T, Strub J. Überlebensrate von IPS-Empress 2 Vollkeramikronen und-brücken: Drei-Jahres-Ergebnisse. *Schweiz Monatsschr Zahnmed* 2004;114:115–119.
32. Marquardt P, Strub JR. Survival rates of IPS empress 2 all-ceramic crowns and fixed partial dentures: results of a 5-year prospective clinical study. *Quintessence Int* 2006;37:253–259.
33. Holand W, Schweiger M, Watzke R, Peschke A, Kappert H. Ceramics as biomaterials for dental restoration. *Expert Rev Med Devices* 2008;5:729–745.
34. Sailer I, Feher A, Filser F, Gauckler LJ, Lüthy H, Hämmerle CH. Five-year clinical results of zirconia frameworks for posterior fixed partial dentures. *Int J Prosthodont* 2007;20:383–388.
35. Crisp RJ, Cowan AJ, Lamb J, Thompson O, Tulloch N, Burke FJ. A clinical evaluation of all-ceramic bridges placed in UK general dental practices: first-year results. *Br Dent J* 2008;205:477–482.
36. Sailer I, Feher A, Filser F, Lüthy H, Gauckler L, Schärer P et al. Prospective clinical study of zirconia posterior fixed partial dentures: 3-year follow up. *Quintessence Int* 2006;37:685–693.
37. Sturzenegger B FA, Lüthy H, Schumacher M, Loeffel O, Filser F, Kocher P, Gauckler L, Schärer P. Clinical Evaluation of Zirconium Oxide Bridges in the Posterior Segments Fabricated with the DCM System. *Acta Med Dent Helv* 2000;5:131–139.
38. Sailer I, Feher A, Filser F, Lüthy H, Gauckler LJ, Schärer P, et al. Prospective clinical study of zirconia posterior fixed partial dentures: 3-year follow-up. *Quintessence Int* 2006;37:685–693.
39. Filser F, Lüthy H., Schärer P., Gauckler L. All-ceramic dental bridges by direct ceramic machining (DCM). *Materials in medicine ETH Zürich* 1997:165–189.
40. Ryge G, Snyder M. Evaluating the clinical quality of restorations. *J Am Dent Assoc* 1973;87:369–377.
41. O'Leary TJ, Drake RB, Naylor JE. The plaque control record. *J Periodontol* 1972;43:38.
42. Kaplan EL, Meier P. Nonparametric estimation from incomplete observation. *J Am Statist Ass* 1958;53:457–481.
43. Oh W, Gotzen N, Anusavice KJ. Influence of connector design on fracture probability of ceramic fixed-partial dentures. *J Dent Res* 2002;81:623–627.
44. Oh WS, Anusavice KJ. Effect of connector design on the fracture resistance of all-ceramic fixed partial dentures. *J Prosthet Dent* 2002;87:536–542.
45. Fischer H, Weber M, Marx R. Lifetime prediction of all-ceramic bridges by computational methods. *J Dent Res* 2003;82:238–242.
46. Kelly JR, Tesk JA, Sorensen JA. Failure of all-ceramic fixed partial dentures in vitro and in vivo: analysis and modeling. *J Dent Res* 1995;74:1253–1258.
47. Taskonak B, Yan J, Mecholsky JJ Jr., Sertgoz A, Kocak A. Fractographic analyses of zirconia-based fixed partial dentures. *Dent Mater* 2008;24:1077–1082.
48. Taskonak B, Griggs JA, Mecholsky JJ Jr., Yan JH. Analysis of subcritical crack growth in dental ceramics using fracture mechanics and fractography. *Dent Mater* 2008;24:700–707.
49. Peterson IM, Pajares A, Lawn BR, Thompson VP, Rekow ED. Mechanical characterization of dental ceramics by hertzian contacts. *J Dent Res* 1998;77:589–602.
50. Kosmac T, Oblak C, Jevnikar P, Funduk N, Marion L. The effect of surface grinding and sandblasting on flexural strength and reliability of Y-TZP zirconia ceramic. *Dent Mater* 1999;15:426–433.
51. Aboushelib MN, Kleverlaan CJ, Feilzer AJ. Effect of zirconia type on its bond strength with different veneer ceramics. *J Prosthodont* 2008;17:401–408.
52. Fischer J, Stawarczyk B, Trottman A, Hämmerle CH. Impact of thermal misfit on shear strength of veneering ceramic/zirconia composites. *Dent Mater* 2009;25:419–423.
53. Fischer J, Stawarczyk B, Sailer I, Hämmerle CH. Shear bond strength between veneering ceramics and ceria-stabilized zirconia/alumina. *J Prosthet Dent* 2010;103:267–274.
54. Fischer J, Grohmann P, Stawarczyk B. Effect of zirconia surface treatments on the shear strength of zirconia/veneering ceramic composites. *Dent Mater J* 2008;27:448–454.
55. Tholey MJ, Swain MV, Thiel N. SEM observations of porcelain Y-TZP interface. *Dent Mater* 2009;25:857–862.
56. Tholey MJ, Berthold C, Swain MV, Thiel N. XRD2 micro-diffraction analysis of the interface between Y-TZP and veneering porcelain: role of application methods. *Dent Mater* 2010;26:545–552.
57. Swain MV. Unstable cracking (chipping) of veneering porcelain on all-ceramic dental crowns and fixed partial dentures. *Acta Biomater* 2009;5:1668–1677.
58. Dittmer MP, Borchers L, Stiesch M, Kohorst P. Stresses and distortions within zirconia-fixed dental prostheses due to the veneering process. *Acta Biomater* 2009;5:3231–3239.
59. Fischer J, Stawarczyk B, Hämmerle CH. Flexural strength of veneering ceramics for zirconia. *J Dent* 2008;36:316–321.
60. Choi BK, Han JS, Yang JH, Lee JB, Kim SH. Shear bond strength of veneering porcelain to zirconia and metal cores. *J Adv Prosthodont* 2009;1:129–135.
61. Rosentritt M, Steiger D, Behr M, Handel G, Kolbeck C. Influence of substructure design and spacer settings on the in vitro performance of molar zirconia crowns. *J Dent* 2009;37:978–983.

62. Marchack BW, Futatsuki Y, Marchack CB, White SN. Customization of milled zirconia copings for all-ceramic crowns: A clinical report. *J Prosthet Dent* 2008;99:169–173.
63. Hsueh CH, Thompson GA, Jadaan OM, Wereszczak AA, Becher PF. Analyses of layer-thickness effects in bilayered dental ceramics subjected to thermal stresses and ring-on-ring tests. *Dent Mater* 2008;24:9–17.
64. Coelho PG, Silva NR, Bonfante EA, Guess PC, Rekow ED, Thompson VP. Fatigue testing of two porcelain-zirconia all-ceramic crown systems. *Dent Mater* 2009;25:1122–1127.
65. Fischer H, Schafer M, Marx R. Effect of surface roughness on flexural strength of veneer ceramics. *J Dent Res* 2003;82:972–975.
66. Schmitt J, Wichmann M, Karl M, Gollner M, Lohbauer U, Holst S. Surface characteristics of zirconia-based posterior restorations: clinical and scanning electron microscopic analysis. *J Can Dent Assoc* 2011;77:b31.
67. Beuer F, Aggstadler H, Edelhoff D, Gernet W, Sorensen J. Marginal and internal fits of fixed dental prostheses zirconia retainers. *Dent Mater* 2009;25:94–102.
68. Kohorst P, Junghanns J, Dittmer MP, Borchers L, Stiesch M. Different CAD/CAM-processing routes for zirconia restorations: influence on fitting accuracy. *Clin Oral Investig* 2010;DOI:10.1007/s00784-010-0415-9.
69. Vigolo P, Fonzi F, Majzoub Z, Cordioli G. An in vitro evaluation of ZiReal abutments with hexagonal connection: in original state and following abutment preparation. *Int J Oral Maxillofac Implants* 2005;20:108–114.
70. Gonzalo E, Suarez MJ, Serrano B, Lozano JF. A comparison of the marginal vertical discrepancies of zirconium and metal ceramic posterior fixed dental prostheses before and after cementation. *J Prosthet Dent* 2009;102:378–384.



**Address/Adresse:** Caroline Sax, ZA and PD Dr. Irena Sailer, Clinic for Fixed and Removable Prosthodontics and Dental Materials, School of Dental Medicine, University of Zurich, Plattenstr. 11, 8032 Zurich, Switzerland. Fax: +41 (0)44 634 43 05, E-Mail: [irena.sailer@zzm.unizh.ch](mailto:irena.sailer@zzm.unizh.ch)

#### ZA Caroline Sax

Currently postgraduate student at the Clinic for Fixed and Removable Prosthodontics and Dental Materials, School of Dental Medicine, University of Zurich, Switzerland (Director: Prof. Dr. C.H.F. Hammerle). Study at the University of Zurich and graduation 2004. From 2004 until 2009 she worked in a private dental office in Zurich.

Since February 2009 she has worked als postgraduate student at the Clinic for Fixed and Removable Prosthodontics and Dental Materials, School of Dental Medicine at the University of Zurich.

#### ZA Caroline Sax

Aktuell Assistenz Zahnärztin an der Klinik für Kronen- und Brückenprothetik, Teilprothetik und zahnärztliche Materialkunde, Zentrum für Zahnmedizin, Universität Zürich, Schweiz (Klinikdirektor: Prof. Dr. C.H.F. Hammerle). Studium an der Universität Zürich und 2004 Abschluss mit dem Staatsexamen.

Von 2004 bis 2009 war sie als Assistenz Zahnärztin in der Privatpraxis in Zürich tätig.

Seit Februar 2009 ist sie als Weiterbildungsassistentin an der Klinik für Kronen- und Brückenprothetik, Teilprothetik und zahnärztliche Materialkunde an der Universität in Zürich tätig.